

Reproduzierbare Beaufschlagung von Membranfiltern mit luftgetragenen Metallen zur Durchführung von Ringversuchen – Teil II

Y. Giesen, C. Monsé, F. Nürnberger, B. Maybaum, C. Hagemann, J. Poprizki, K. Pitzke, C. Monz, M. Kirchner, K. Timm, D. Breuer

Zusammenfassung Nach der Entwicklung eines Aerosolgenerators für Metalloxid-Nanopartikel ist es nun möglich, Filter mit Metallstäuben zu belegen. Die Stäube werden durch einen Staubtunnel in eine Messkammer eingeleitet, in der eine homogene Verteilung gewährleistet ist. Mit einem neu entwickelten Mehrfach-Probensammelsystem für GSP-Probenaufnahmeköpfe können gleichzeitig bis zu 96 Filter beaufschlagt werden. In umfangreichen Testserien konnte gezeigt werden, dass die Beaufschlagung mit den Metalloxid-Nanopartikeln homogen ist. Ausgehend von einer Lösung können gleichzeitig Oxide der folgenden Metalle generiert werden: Kupfer (Cu), Blei (Pb), Zink (Zn), Cobalt (Co) und Nickel (Ni). Das System ist robust und arbeitet zuverlässig. Sollte es dennoch für einzelne Filter zu einer verminderten Beaufschlagung kommen, beispielsweise durch eine lokale Undichtigkeit am Probenahmeport, können diese Filter durch den Einsatz eines Colorimeters frühzeitig identifiziert und aussortiert werden. Ein Laborvergleich für die Analyse der auf diese Weise beaufschlagten Filter zwischen vier Laboren mit unterschiedlicher Analysetechnik zeigte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die relativen Standardabweichungen lagen laborübergreifend für die fünf angegebenen Metalle zwischen 2,7 und 5,4 %.

Reproducible loading of membrane filters with airborne metals for use in proficiency testings – part II

Abstract Now that an aerosol generator for metal oxide nanoparticles has been developed, it is possible to expose filters to metal dusts. The dusts are fed through a dust tunnel into a measuring chamber in which a homogeneous distribution is ensured. With a newly developed multiple sampling system for GSP sampling heads, up to 96 filters can now be exposed at the same time. In extensive series of tests, it has been possible to show that the exposure to metal oxide particles is homogeneous. Starting with one solution, oxides of the following metals can be generated at the same time: copper (Cu), lead (Pb), zinc (Zn), cobalt (Co) and nickel (Ni). The system is robust and operates reliably. Should individual filters nevertheless show reduced exposure, e.g. due to local

leakage at the sampling port, these filters can be identified and sorted out early on with the aid of a colorimeter. A comparison of the analysis of the filters exposed in this way carried out at four laboratories using different analysis techniques revealed a good match of the results. The relative standard deviations across laboratories for the five mentioned metals ranged from 2.7 to 5.4 %.

1 Einleitung

Zur Einhaltung von Qualitätsanforderungen an Analyseverfahren müssen Messstellen unterschiedliche Methoden der Qualitätssicherung einsetzen. In der Norm DIN EN ISO/IEC 17025 wird als eine Maßnahme zur Sicherung der Qualität „die Teilnahme an Programmen von Vergleichen zwischen Laboratorien empfohlen“ [1]. Ebenso werden Ringversuche in der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 als eine Möglichkeit zur Überprüfung der Richtigkeit von Messverfahren angegeben [2]. Für Messstellen bietet die Teilnahme an Ringversuchen die Möglichkeit, die Qualität ihrer Messergebnisse zu überprüfen und gleichzeitig gegenüber Dritten ihre Eignung zu belegen. Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) in Sankt Augustin bietet seit 1989 verschiedene Ringversuche an [3]. Dieses Angebot hat sich für Messungen von Gefahrstoffen international etabliert, insbesondere für Ringversuche mit flüchtigen Stoffen durch den Einsatz einer dynamischen Prüfgasstrecke [4]. Ringversuche für Metalle und metallhaltige Stäube wurden ebenfalls bereits frühzeitig durch das IFA angeboten [5]. Dabei wurden Stäube eingesetzt, wie sie typischerweise an Arbeitsplätzen auftreten können. Eine besondere Schwierigkeit bildete immer die Auswahl eines geeigneten Staubes. Üblicherweise wurden Stäube aus Filteranlagen verwendet, die im IFA für den Einsatz als Ringversuchsmaterial aufgearbeitet werden mussten. Dazu wurde der Staub auf eine einheitliche Korngröße zerkleinert und anschließend homogenisiert. Für seine Ringversuche auf Metalle gibt das IFA den Standardaufschluss der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) bzw. des IFA vor [6; 7]. Dadurch wird sichergestellt, dass Messstellen vergleichbare Ergebnisse für die Metallgehalte der Stäube ermitteln können.

Referenzmaterialien für Metallstäube können bisher nur sehr eingeschränkt verwendet werden. Das ist zum einen in deren hohen Kosten begründet, zum anderen in der mangelnden Verfügbarkeit von Stäuben, wie sie typischerweise am Arbeitsplatz auftreten. Der wesentliche Grund aber ist, dass die Metallgehalte der wenigen verfügbaren Referenzmaterialien mit einem für Arbeitsplatzmessungen nicht eingeführten Aufschlussverfahren bestimmt wurden. Für Ringversuche zu Arbeitsplatzmessungen sind diese Referenzmaterialien ungeeignet, da dadurch keine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

Dipl.-Chem. Yvonne Giesen, Franziska Nürnberger M.Sc.,
Brigitte Maybaum, Cornelia Hagemann, Jana Poprizki, M.Sc.,
Dipl.-Chem. Katrin Pitzke, Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Breuer,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dr. rer. nat. Christian Monsé,
Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen
Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA), Bochum.

Dipl.-Ing. Christian Monz, Dr. rer. nat. Michael Kirchner,
Institut für Gefahrstoff-Forschung, Berufsgenossenschaft Rohstoffe
und chemische Industrie, Bochum.

Dr. rer. nat. Kurt Timm,
Kompetenz-Center Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe,
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Leuna.

Tabelle 1. Soll-Konzentrationen und Einwaagen für die Metallsalz-Präkusorenlösung; AGW: Arbeitsplatzgrenzwert, AK: Akzeptanzkonzentration, TK: Toleranzkonzentration.

Metall	Beurteilungsmaßstab in µg/m³	Soll-Konzentration in µg/m³	Soll-Konzentration in µg/Filter
Kupfer	10 (AGW)	7,5	9
Zink	100 (AGW)	90	108
Blei	100 (AGW)	30	36
Cobalt	0,5 (AK)	5	6
Nickel	6 (AK = TK)	12	14,4

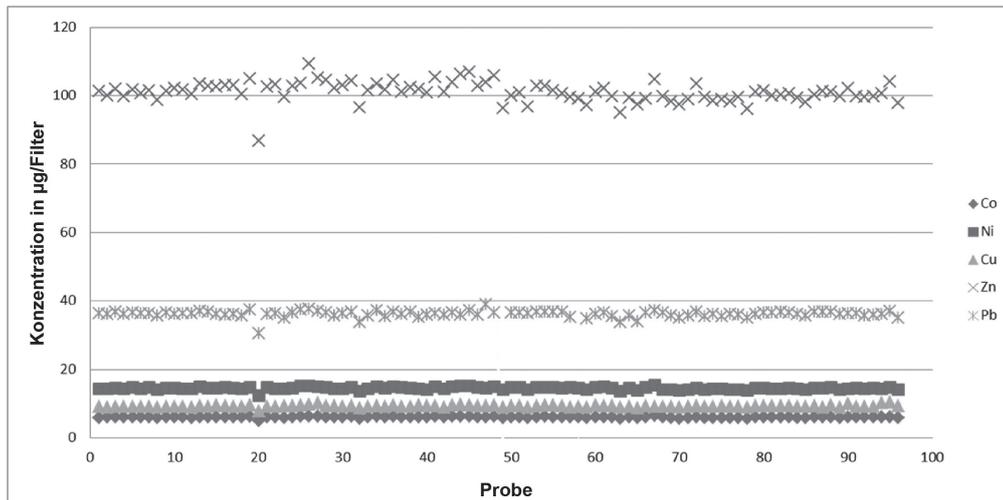


Bild 1. Ergebnisse der gleichzeitigen Belegung von 96 Filtern mit fünf unterschiedlichen Metallen.

2 Vorversuche

Ein Kooperationsprojekt unter gemeinsamer Nutzung von Ressourcen des IFA, des Instituts für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA) und des Technikums des Instituts für Gefahrstoff-Forschung (IGF) der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) soll diese Lücke schließen [8]. Dafür wurde ein Mehrfach-Proben-sammelsystem (MPSS) entwickelt und getestet, das die gleichzeitige Belegung von 96 Probenträgern (Filtern) ermöglicht. Für die Partikelerzeugung kam ein im IPA entwickelter Aerosolgenerator für nanoskalige Metalloxide zum Einsatz [9]. Die Probenahme erfolgte am Staubtunnel des Technikums des IGF in Dortmund, wo eine geeignete Messkammer ausreichender Größe (22 m³) zur Verfügung steht [10]. Die analytische Bestimmung der Metallgehalte erfolgte mittels Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzspektrometrie (TXRF) im IFA. In diesen Vorversuchen wurde das System mit den Metallen Zink, Kupfer und Blei getestet. Eingesetzt wurden sie jeweils als organische Salze, deren Anionen bei der Pyrolyse zur Erzeugung der Aerosole vollständig verbrennen.

In diesen Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Kombination von Partikelerzeugung, Staubtunnel und Mehrfach-Probenahmesystem zu einer homogenen und repro-

duzierbaren Belegung der Filter mit Metalloxid-Nanopartikeln führt [8].

2.1 Simultane Filterbelegung mit fünf Metallen

Die Partikelgenerierung wurde nun auf zusätzliche Metalle ausgeweitet. Neben den bereits getesteten Metallen Zink, Kupfer und Blei wurden zudem die ebenfalls zweiwertigen Metallionen Cobalt und Nickel in Form ihrer Acetate eingesetzt.

Die erwarteten Soll-Konzentrationen der luftgetragenen Metallionen unter den eingestellten Bedingungen (Dosier-volumenstrom 1 ml/min, Gesamtfluss ca. 2 000 m³/h, 1,2 m³ Probenahmeluftvolumen) sind in Tabelle 1 dargestellt und orientieren sich an den aktuellen Arbeitsplatzgrenzwerten und anderen geltenden Beurteilungsmaßstäben der jeweiligen Metalle. In Bild 1 sind die Ergebnisse dieses Versuches grafisch dargestellt.

Zum einen zeigt sich, dass das System auch für die

Metalle Cobalt und Nickel gut geeignet ist. Zum anderen sieht man, dass die Größenordnung der Soll-Konzentrationen verhältnismäßig gut erreicht wird. Entscheidend aber ist, dass die Proben homogen beaufschlagt wurden. Mit relativen Standardabweichungen zwischen 2,1 und 4,2 % (Tabelle 2) kann von einer homogenen Beaufschlagung ausgegangen werden. Auffällig ist allerdings die Probe 20 (siehe Bild 1). Die Konzentration auf diesem Filter ist für alle fünf Metallgehalte deutlich geringer. Sieht man sich die Zahlen im Detail an, ist festzustellen, dass die Wiederfindung für alle Metalle bei ca. 85 % liegt. Es ist also sehr unwahrscheinlich, dass es sich um ein analytisches Problem handelt. Vielmehr scheint hier tatsächlich bei der Beaufschlagung ein Fehler aufgetreten zu sein. Eine nachträgliche Überprüfung des Probenahmeports und des GSP-Kopfes (GSP: Gesamtstaub-Probenahme) lieferte allerdings keinen Hinweis auf eine mögliche Ursache. Dennoch liegt die Vermutung nahe, dass an einer dieser beiden Stellen eine Undichtigkeit vorlag. Alle GSP-Köpfe werden allerdings vor ihrer Verwendung auf ihre Dichtigkeit geprüft, indem Unterdruck angelegt wird, der für eine definierte Zeit gehalten werden muss, sodass die Schlauchverbindung am MPSS als mögliche Ursache wahrscheinlicher ist.

Ein solcher Ausreißer ist für die Herstellung von Ringversuchsproben bzw. Referenzmaterialien nicht akzeptabel. Schließlich muss die gleichartige Beaufschlagung exakt

Tabelle 2. Statistische Auswertung der gleichzeitigen Belegung von 96 Filtern mit fünf Metallen.

Konzentration	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink	Blei
Mittelwert in µg	6,01	14,5	8,81	101	36,2
Standardabweichung in µg	0,15	0,32	0,37	2,50	0,78
relative Standardabweichung in %	2,5	2,2	4,2	2,5	2,1



Bild 2. Colorimeter auf Filterhalterung.

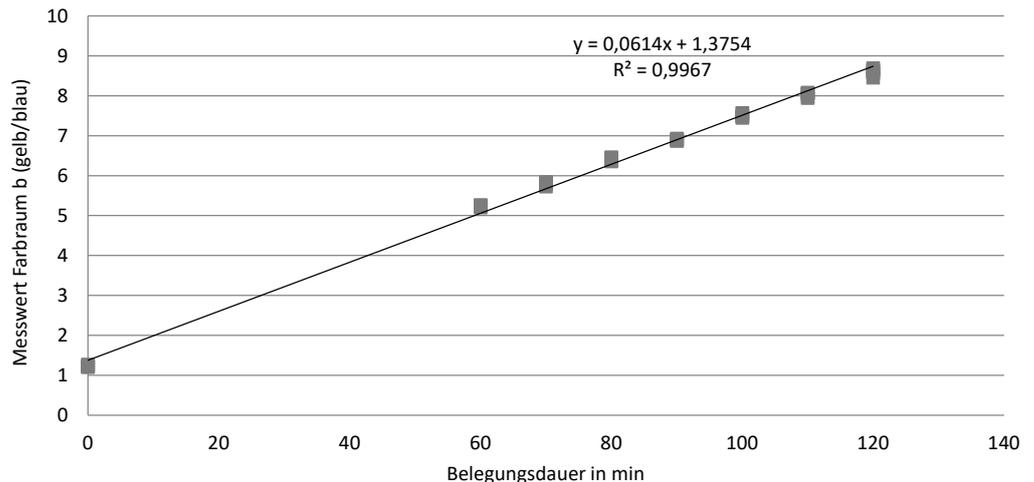


Bild 3. Abhängigkeit der Farbintensität im Farbraum b des Colorimeters von der Belegungsdauer.

und absolut verlässlich sein. Die in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse sind inklusive des Ausreißers (Probe 20) berechnet. Eliminiert man diesen Ausreißer, liegen die relativen Standardabweichungen zwischen 2,0 und 3,8 %.

2.2 Verwendung eines Colorimeters

Da die Ursache für den Ausreißer nicht zweifelsfrei ermittelt werden konnte, wurde nach einem Weg gesucht, zukünftige mögliche Ausreißer nach der Beaufschlagung und vor der Metallanalyse zu identifizieren. Auf diese Weise könnten sie rechtzeitig vor der Verwendung erkannt und entsprechend aussortiert werden. Da die beaufschlagten Filter leicht gelblich gefärbt sind und zwischen verschiedenen Konzentrationen leichte Farbunterschiede visuell wahrnehmbar sind, erschien die Verwendung eines Colorimeters zur Messung der Farbintensität naheliegend.

Das PCE-CSM 5-Colorimeter der Fa. PCE Deutschland, Meschede (Bild 2), ist klein und handlich und damit gut direkt vor Ort einsetzbar. In ersten Testmessungen zeigte sich, dass das Colorimeter für die oben beschriebene Anwendung geeignet zu sein scheint. Für diese ersten Tests wurden insgesamt neun Filter, davon je drei beaufschlagt mit derselben Konzentration von Metalloxiden, an den Hersteller geschickt. Dort wurden die Messwerte für die Filter in unterschiedlichen Farbräumen ermittelt. Es zeigte sich, dass die Konzentrationsunterschiede gut erfasst werden konnten. Am deutlichsten konnte dies im Farbraum gelb/blau (Farbraum b) gezeigt werden.

Daraufhin wurde eine Versuchsreihe am Staubtunnel durchgeführt, bei der geprüft werden sollte, ob auch geringe Konzentrationsunterschiede mit dieser Methode sicher erkannt werden können.

Dazu wurden Filter unter gleichen Bedingungen mit derselben Metallsalz-Präkusorenlösung unterschiedlich lange beaufschlagt. Die Probenahmedauern wurden dabei in 10-Minuten-Schritten zwischen 60 und 120 min variiert. Um den Einfluss von Störlicht bei der colorimetrischen Messung zu verringern, wurden die Filterkapseln zur Auswertung in eine zusätzlich gefertigte lichtdichte Halterung vor dem Colorimeter eingesetzt (Bild 2).

Zunächst wurden die Filter unbeaufschlagt mit dem Colorimeter im Farbraum b gemessen. Anschließend wurden die Filter mit Metalloxiden belegt. Nach 60 min wurde das erste

MPSS abgeschaltet und dann im Abstand von je 10 min immer ein weiteres, bis zu einer maximalen Probenahmedauer von 120 min. Anschließend wurde alle Filter mit dem Colorimeter im Farbraum b vermessen. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Aufgetragen ist hier der Messwert im Farbraum b gegen die Probenahmedauer.

Die Korrelation zwischen Belegungsdauer und Messwert des Colorimeters ist mit $R^2 = 0,9967$ sehr gut. Rechnet man das entsprechend auf die Konzentration des Kupfers um, das den größten Beitrag zur Färbung der Filter liefert, ergibt sich die Darstellung in Bild 4.

Die Proben 1 bis 6 entsprechen einer Probenahmedauer von 60 min, die Proben 7 bis 12 einer Probenahmedauer von 70 Minuten usw. bis hin zu einer Probenahmedauer von 120 min für die Proben 37 bis 42. Wie man sieht, lassen sich mit dieser Methode auch kleine Konzentrationsänderungen gut detektieren. Das Colorimeter ist demnach geeignet, Proben mit einer verminderten Beaufschlagung zu identifizieren. Es wird nun standardmäßig zur Qualitätskontrolle und Überprüfung der Filterbelegung eingesetzt. Zu bemerken bleibt allerdings, dass die Messwerte mit der Zeit abnehmen. Die Farbmessung wurde täglich über einen Zeitraum von einem bis acht Tagen nach der Probenahme wiederholt. Dabei zeigte sich, dass die Werte und damit die Färbung kontinuierlich abnahmen, möglicherweise durch die Alterung des Niederschlags und damit verbundene Agglomeratbildung o. Ä. Da die Abnahme aber für alle Filter gleichartig erfolgte, kann die Farbmessung dennoch, wenn sie zusammenhängend für eine Probenserie durchgeführt werden, angewendet werden. Eine Nachmessung einzelner Filter zu einem späteren Zeitpunkt ist jedoch nicht möglich.

3 Laborvergleich

Zur weiteren Qualitätskontrolle und Absicherung der bisherigen Ergebnisse wurde ein Laborvergleich für die Analyse der beaufschlagten Filter durchgeführt. Daran nahmen vier Labore mit teilweise unterschiedlichen Analysemethoden teil. Beteiligt waren das IFA, das IGF in Bochum und das Analytiklabor der BG RCI in Leuna. Im IFA wurden die Proben in zwei unterschiedlichen Laboren untersucht: eine Filterserie mittels ICP/MS (inductively coupled plasma

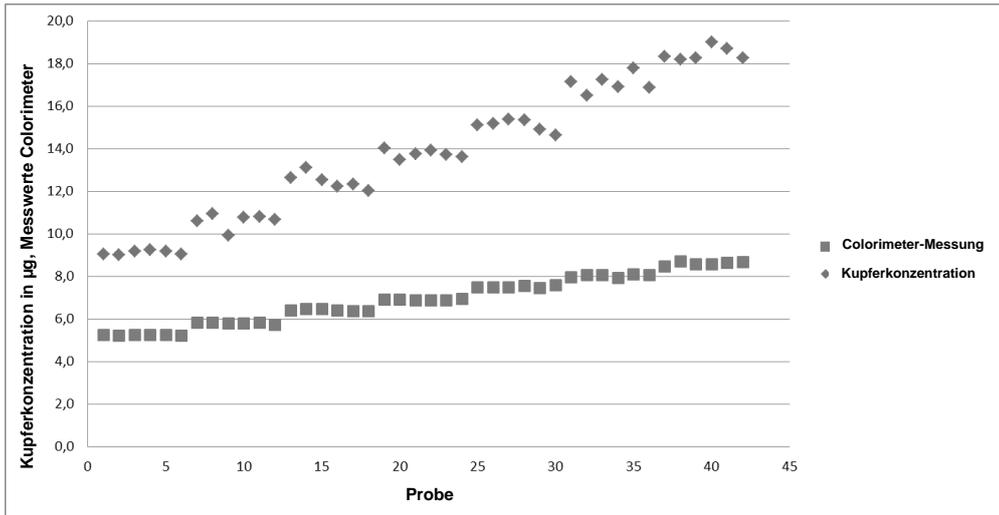


Bild 4. Colorimeter-Test: Darstellung der Colorimeter-Messwerte in Zusammenhang mit der berechneten Kupferkonzentration.

Vergleich zwischen verschiedenen Laboren und unterschiedlichen Analysetechniken ein sehr gutes Ergebnis.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Versuche belegen, dass das hier vorgestellte System zur Beaufschlagung von Membranfiltern zuverlässig funktioniert und eine homogene Belegung mit luftgetragenen Metalloxid-Nanopartikeln gewährleistet. Die so belegten Probenträger sind geeignet für den Einsatz als Ringversuchspröben.

mass spectrometry) und eine andere mit Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzspektrometrie (TXRF). Am IGF kam die Flammen-Atom-Absorptions-Spektrometrie (FAAS) zum Einsatz, während in Leuna ebenfalls mit ICP/MS analysiert wurde. Für diesen Versuch wurden wiederum jeweils 96 Filter mit drei unterschiedlichen Konzentrationen von Metalloxiden beaufschlagt. Alle bisher getesteten Metalle (Cu, Pb, Zn, Co, Ni) wurden eingesetzt. Die Konzentrationen orientierten sich an den aktuell geltenden Beurteilungsmaßstäben und lagen etwa zwischen dem 0,5-Fachen und 2-Fachen des Grenzwertes. Da die Akzeptanzkonzentration für Cobalt mit $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sehr niedrig ist, wurde hier ein höherer Konzentrationsbereich (2,5-facher bis 18-facher Grenzwert) gewählt, um den Einsatz verschiedener, auch weniger empfindlicher Analysetechniken zu ermöglichen.

Jedes Labor erhielt pro Konzentration zwölf Filter und zusätzlich eine Vergleichslösung mit definierter Konzentration. Diese diente dazu, die Analytik der Labore unabhängig vom Aufschlussverfahren zu überprüfen, um so den Einfluss des angewendeten Aufschlusses auf etwaige Abweichungen bei der Analyse der Filter ausschließen zu können. Die Ergebnisse des Laborvergleichs sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Die relativen Standardabweichungen liegen laborübergreifend zwischen 2,5 und 5,4 %. Das ist insbesondere für einen

Zusätzlich soll auch ein entsprechendes Referenzmaterial hergestellt werden. Dazu muss jedoch eine wesentlich größere Anzahl von Proben (> 400) produziert werden. Da das bisherige System nur eine gleichzeitige Belegung von 96 Filtern ermöglicht, muss die Belegung für eine entsprechend große Probenserie, wie sie für ein Referenzmaterial notwendig ist, an mehreren Tagen erfolgen. Dazu müssen die Umgebungsbedingungen in der Messkammer und am Staubtunnel allerdings konstant gehalten werden können. Zurzeit existieren noch keine Möglichkeiten, die exakten Temperatur-, Feuchtigkeits- und Druckbedingungen bei der Filterbeaufschlagung zu reproduzieren. Die vorherrschenden Bedingungen sind an den jeweiligen Versuchstagen von den Außenluftbedingungen bestimmt, sodass zu erwarten ist, dass die Filterbelegungen mit den Außenluftbedingungen variieren. Um das ausgleichen zu können, wurde an der Staubtunnelanlage im IGF ein Heizregister installiert. Dadurch können nun konstante Temperaturbedingungen während der Filterbelegung geschaffen werden. In einem weiteren Versuch muss jetzt gezeigt werden, dass eine homogene Belegung der Filter auch an unterschiedlichen Tagen möglich ist, damit die Herstellung eines Referenzmaterials ermöglicht werden kann.

Tabelle 3. Ergebnisse des Laborvergleichs für fünf Metalle und für drei unterschiedliche Konzentrationen.

m_{absolut}	Blei	Cobalt	Kupfer	Nickel	Zink
Probe 1					
Mittelwert in μg	33,0	5,03	6,53	11,5	98,3
Standardabweichung in μg	1,1	0,2	0,3	0,5	3,2
relative Standardabweichung in %	3,3	4,9	4,2	4,1	3,3
Probe 2					
Mittelwert in μg	144	2,56	13,09	6,48	39,6
Standardabweichung in μg	5,4	0,1	0,6	0,2	1,3
relative Standardabweichung in %	3,7	5,0	4,8	3,1	3,3
Probe 3					
Mittelwert in μg	53,3	9,12	15,9	13,1	82,0
Standardabweichung in μg	1,4	0,2	0,5	0,4	4,4
relative Standardabweichung in %	2,7	2,5	3,4	3,2	5,4

Literatur

- [1] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (2/2017). Berlin: Beuth 2017.
- [2] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). Ausg. 2/2010. GMBI. (2010) Nr. 12, S. S. 231-253; zul. geänd. GMBI. (2016) Nr. 12, S. 843-846.
- [3] *Breuer, D.; Bersenkowitsch, H.; Schenk, H.; Schneider, P.; Blome, H.*: Ringversuch Tetrachlorethen – Qualitätssicherung im Rahmen des Erfahrungsaustausches außerbetrieblicher Meßstellen (I). Staub – Reinhalt. Luft 50 (1990) Nr. 5, S. 203-209.
- [4] *Raschick, F.; Monsé, C.; Gusbeth, K.; Maybaum, B.; Giesen, Y.; Breuer, D.; Monz, C.*: Ringversuche für innerbetriebliche und außerbetriebliche Messstellen an der Prüfgasstrecke des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 76 (2016) Nr. 3, S. S. 78-84.
- [5] *Breuer, D.*: Qualitätssicherung bei der Metallanalytik am Beispiel des Ringversuchs Metallstäube (Kennzahl 1640). In: IFA-Arbeitsmappe – Messung von Gefahrstoffen. 8. Lfg. IV/92. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/1640
- [6] Aufbereitungsverfahren für Stäube zur Bestimmung des Gesamtmetallgehaltes. In: Analytische Methoden zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Luftanalysen. Bd. 1: Spezielle Vorbemerkungen, Abschnitt 4: Probenahme und Bestimmung von Aerosolen und deren Inhaltsstoffen. Hrsg.: Deutsche Forschungsgemeinschaft (2005), Bd. 14. Lfg., S. S. 31-32.
- [7] *Hahn, J. U.*: Aufbereitungsverfahren zur Analytik metallhaltiger Stäube (Kennzahl 6015). In: IFA Arbeitsmappe – Messung von Gefahrstoffen. 34. Lfg./2005. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/6015
- [8] *Giesen, Y.; Hagemann, C.; Nürnberger, F.; Maybaum, B.; Breuer, D.; Monz, C.; Monsé, C.*: Reproduzierbare Beaufschlagung von Membranfiltern mit luftgetragenen Metallen zur Durchführung von Ringversuchen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 76 (2016) Nr. 11/12, S. 415-421.
- [9] *Monsé, C.; Monz, C.; Dahmann, D.; Asbach, C.; Stahlmecke, B.; Lichtenstein, N.; Buchwald, K.-E.; Merget, R.; Bünger, J.; Brüning, T.*: Development and evaluation of a nanoparticle generator for human inhalation studies with airborne zinc oxide. Aerosol Sci. Technol. 48 (2014) Nr. 4, S. 418-426.
- [10] *Pelzer, J.; Monz, C.*: Erfahrungsaustausch und Ringversuch zur Messtechnik für ultrafeine Partikel. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 75 (2015) Nr. 9, S. 355-359.